สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

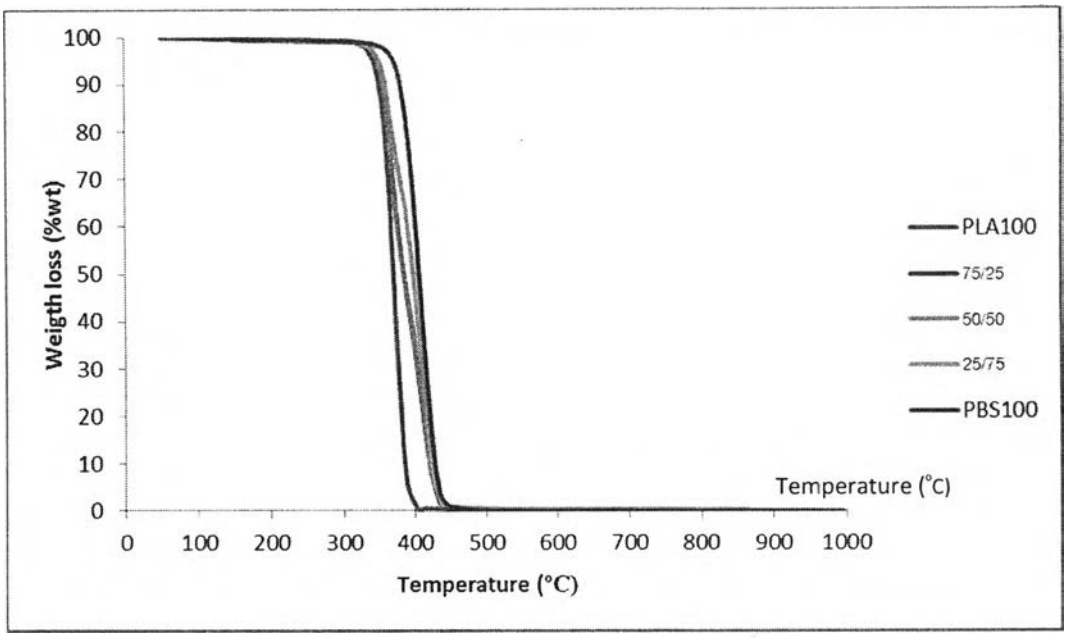
ผลทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม

4.1.1 สมบัติทางความร้อน

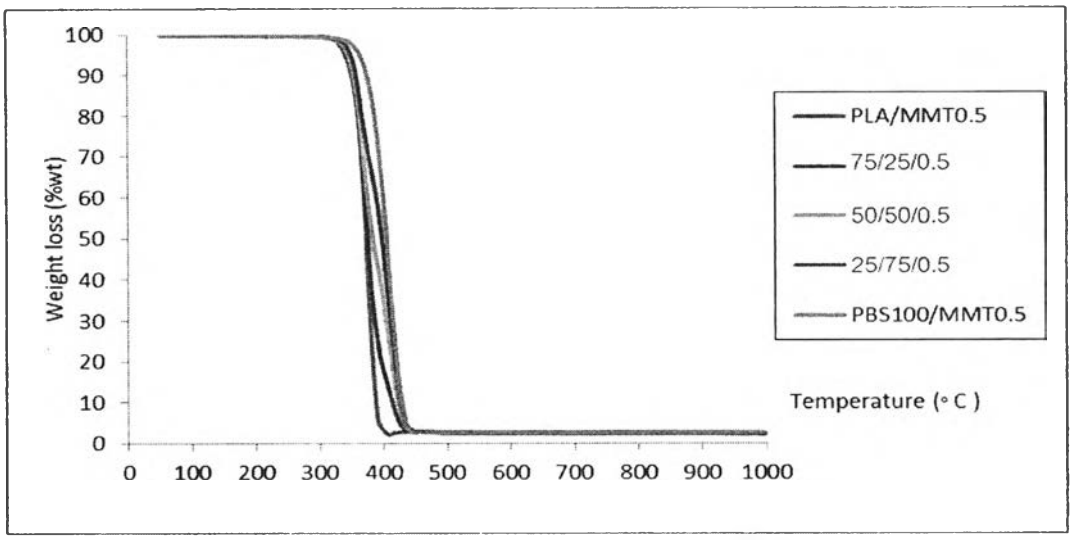
4.1.1.1 อุณหภูมิการสลายตัว

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 พบว่าพอลิแล็กทิกแอซิดเกิดการสลายตัวก่อน โดยมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (onset degradation temperature, T_d onset) ประมาณ 344 องศาเซลเซียส พอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ประมาณ 377 องศาเซลเซียส โดยพอลิเมอร์ผสมจะมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง โดยอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วน 75/25 50/50 และ 25/75 นั้นเกิดการสลายตัวที่ประมาณ 350 355 และ 361 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่อยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด การที่พอลิเมอร์ผสมมีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าพอลิบิวทิลีนซักซิเนตช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์ผสมได้

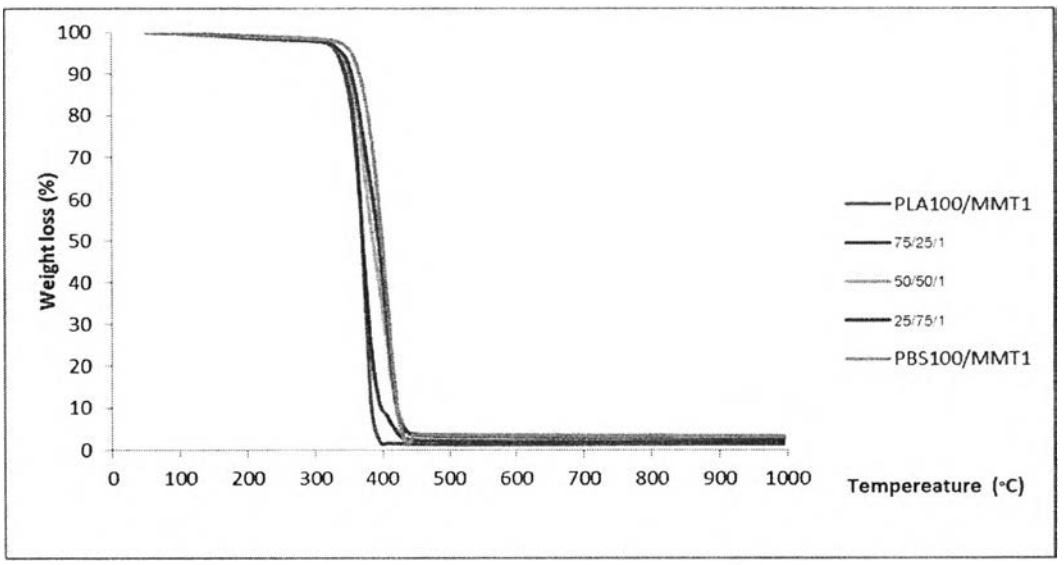


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่เติมออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0.5 และ 1 phr พบว่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 เมื่อเติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ 0.5 phr พบว่ามีค่าอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 353 352 352 360 และ 375 องศาเซลเซียสตามลำดับ และที่เมื่อเติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ 1 phr มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวที่ 356 347 352 359 และ 369 องศาเซลเซียสตามลำดับ และเมื่อเติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ1 phr พบว่าอุณหภูมิการเริ่มสลายตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากสารที่ใช้ทำดัดแปรออร์แกโนเคลย์มีหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อโดนความร้อนจึงเกิดการแตกตัวออกมา ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์บางส่วนเกิดการเสื่อมสลายขาดออกจากกัน



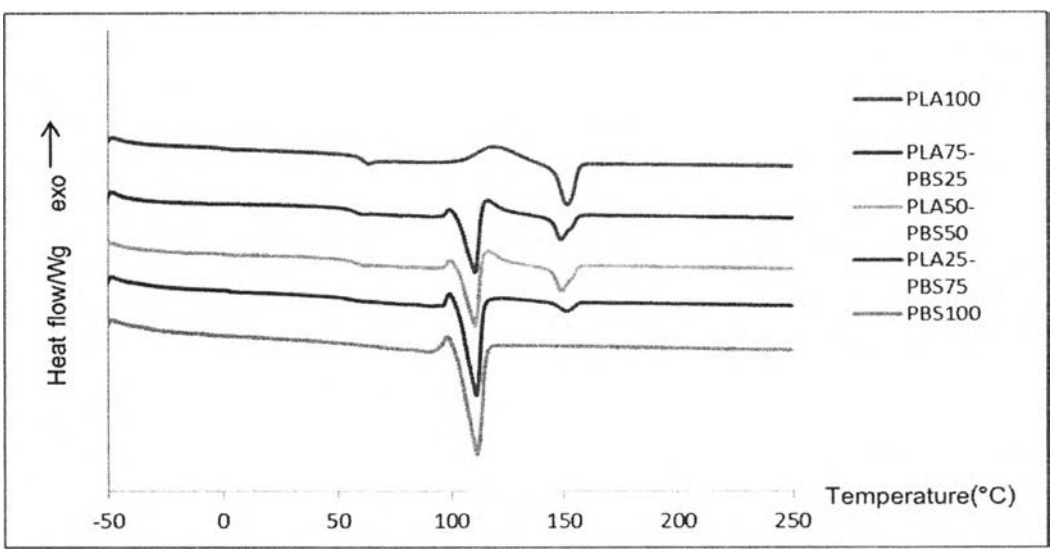
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ 0.5 phr



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ 1 phr

4.1.1.2 อุณหภูมิทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลว

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของพอลิเมอร์ผสมทำการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 จากการทดลองพบว่าปริมาณช่วงการดูดกลืนความร้อนในส่วนของพอลิแล็กทิกแอซิดมีปริมาณลดลงตามปริมาณของพอลิแล็กทิกแอซิดลดลงที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ขณะที่ช่วงการดูดกลืนความร้อนในส่วนของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตพบว่ามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าของพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความเข้ากันได้บางส่วน ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาปริมาณการตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมพบว่าปริมาณผลึกของพอลิแล็กทิกแอซิดลดลง เนื่องจากปริมาณของพอลิแล็กทิกแอซิดลดลง และด้วยข้อจำกัดของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงไม่สามารถหาค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน

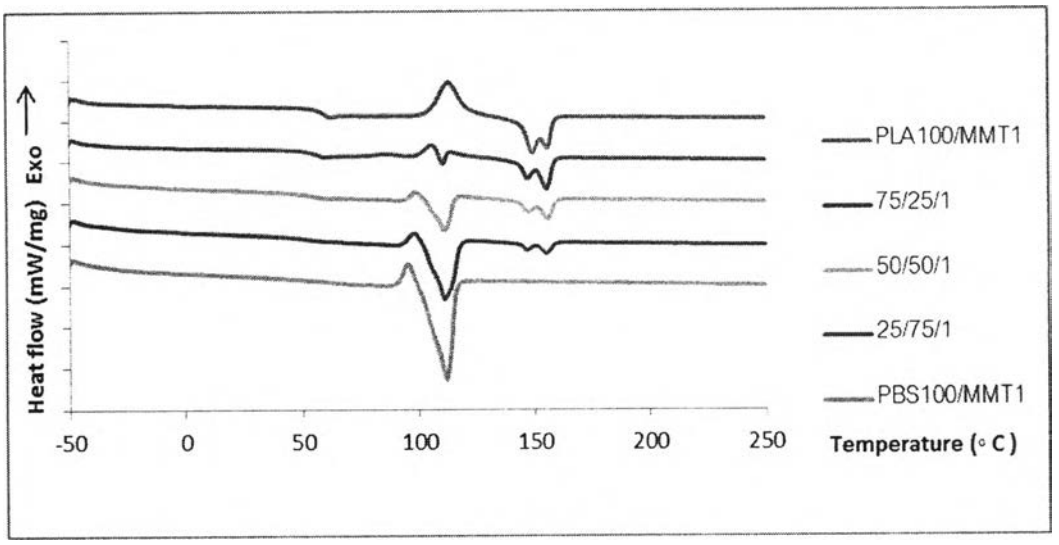
ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตได้ เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่ค่อนข้างต่ำมากอยู่ในช่วงอุณหภูมิ -45 ถึง -55 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

	PLA100	PLA75/PBS25	PLA50/PBS50	PLA25/PBS75	PBS100
T_m (°C)	151.5	110.4	110.5	111	111.5
ΔH_m (J/g)	21.34	12.08	12.48	5.19	-
Tg (°C)	58.0	53.2	53.7	53.1	-
% Crystallinity	22.7	12.9	13.3	5.5	-

***ΔH°_m= 94 J/g (melt enthalpy for 100% crystallized PLA) [28]

เมื่อพิจารณาจากอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแล็กทิกแอซิดที่เติมออร์แกโนเคลย์ 1 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าพอลิแล็กทิกแอซิดจะเกิดอุณหภูมิการหลอมเหลวสองค่า (double melting point temperature) ซึ่งเกิดจากการใช้อัตราการให้ความร้อนที่เร็วเกินไป จึงทำให้พอลิแล็กทิกแอซิดเกิดเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์และผลึกที่สมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เห็นอุณหภูมิหลอมเหลวสองค่า



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ 1 phr

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ 1 phr

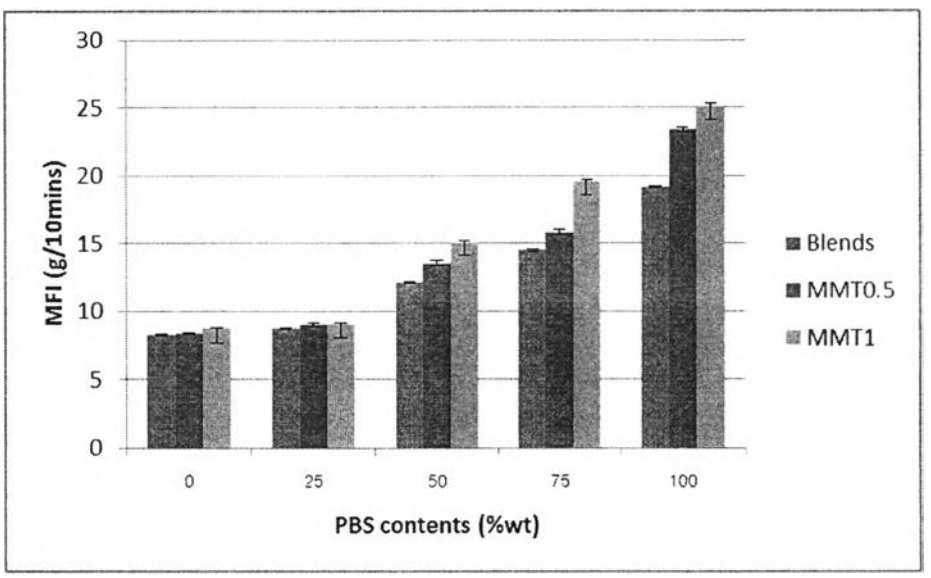
	PLA100/ MMT1	PLA75/PBS25/ MMT1	PLA50/PBS50/ MMT1	PLA25/PBS75/ MMT1	PBS100/ MMT1
T_m (°C)	149.3 155.7	110.4 147.2	111.0 147.3	111.1 146.8	111.8
ΔH_m (J/g)	28.47	23.3	18.16	9.05	60.65
Tg (°C)	56.0	51.4	48.8	47.7	-
% crystallinity	30.3	24.8	19.3	9.6	-

***ΔH°_m = 94 J/g (melt enthalpy for 100% crystallized PLA) [28]

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์เปรียบเทียบกับพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียวที่ทำการเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ พบว่าค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์มีแนวโน้มลงลด อาจเนื่องมาจากออร์แกโนเคลย์สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองเนื่องจากสารที่ใช้ดัดแปรมีหมู่ไฮดรอกซิล

4.1.2 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์

ความสัมพันธ์ของค่าดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ใส่และไม่ใส่ออร์แกโนเคลย์ดัดแปรเป็นสารตัวเติม ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์

จากการทดลองพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีค่าดรรชนีการหลอมไหลเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีอุณหภูมิการหลอมเหลวที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิแล็กทิกแอซิด ณ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตส่งผลให้สายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเกิดการขาดออกบางส่วน ทำให้ความหนืดของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตลดลง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่อค่าดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

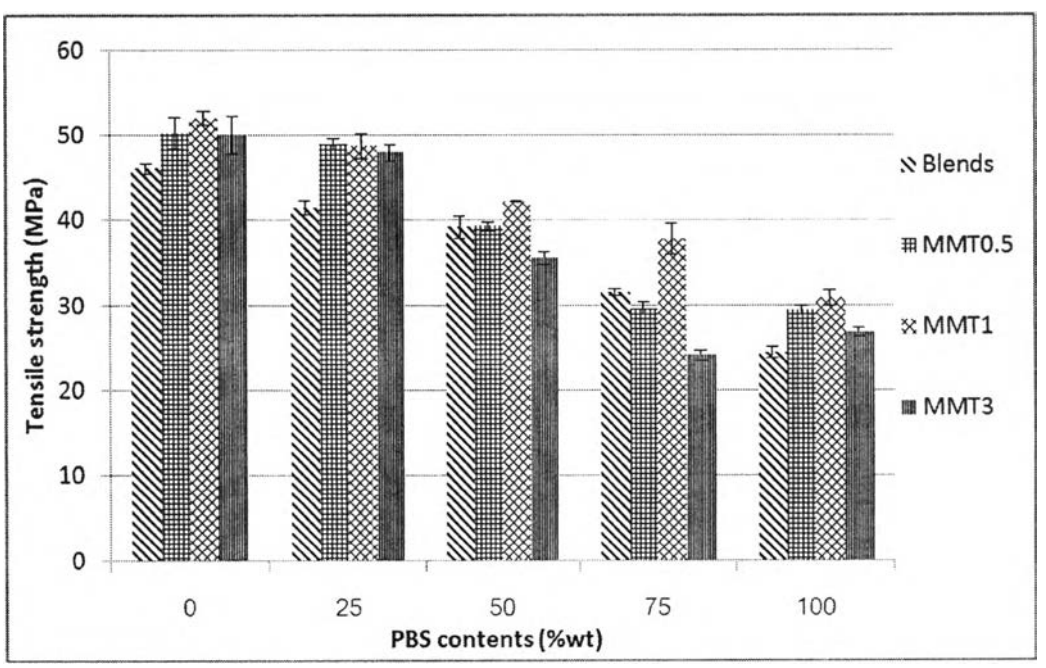
เมื่อเติมออร์แกโนเคลย์ลงไปพบว่าค่าดรรชนีการหลอมไหลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่ออร์แกโนเคลย์ เนื่องมาจากในปริมาณเท่ากันพอลิเมอร์ผสมที่เติมออร์แกโนเคลย์จะมีน้ำหนักมากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมออร์แกโนเคลย์ ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่เติมออร์แกโนเคลย์จึงมีดรรชนีการหลอมไหลที่สูงกว่า เพราะค่าความหนาแน่นของออร์แกโนเคลย์นั้นสูงกว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

4.2 สมบัติเชิงกลของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน

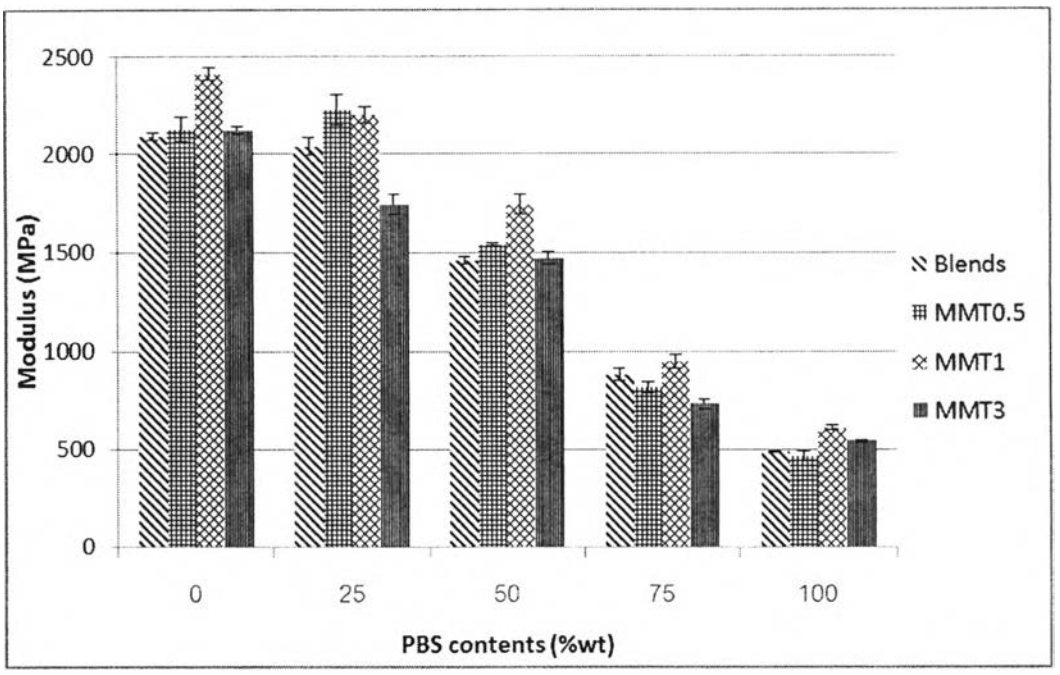
4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง

4.2.1.1 ฟิล์มชั้นเดียว

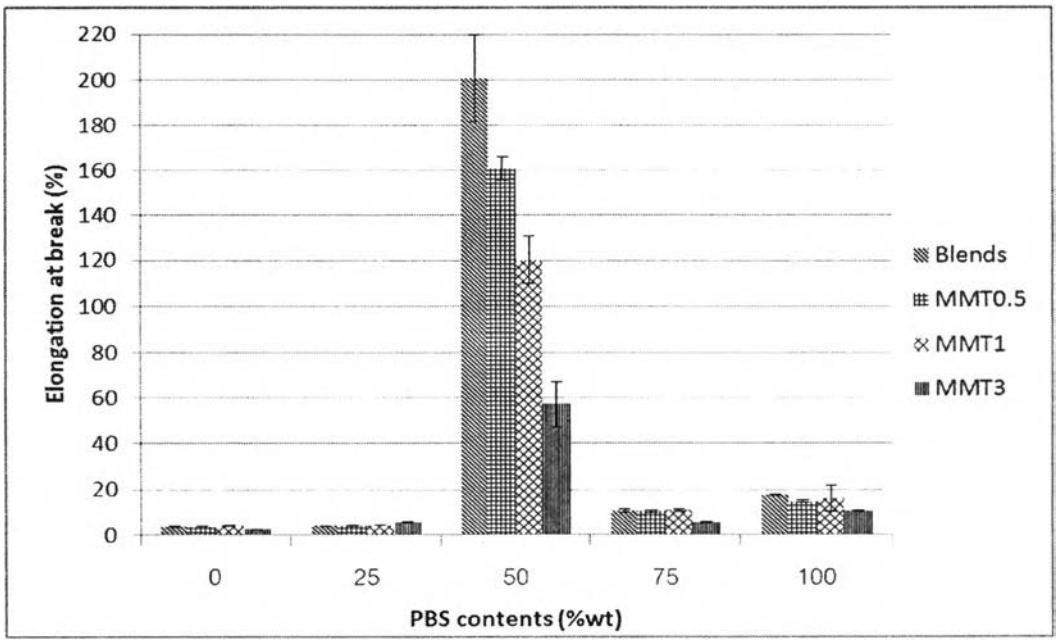
สมบัติความทนแรงดึง มอดุลัสดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ 0.5 1 และ 3 phr แสดงในรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.8 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ

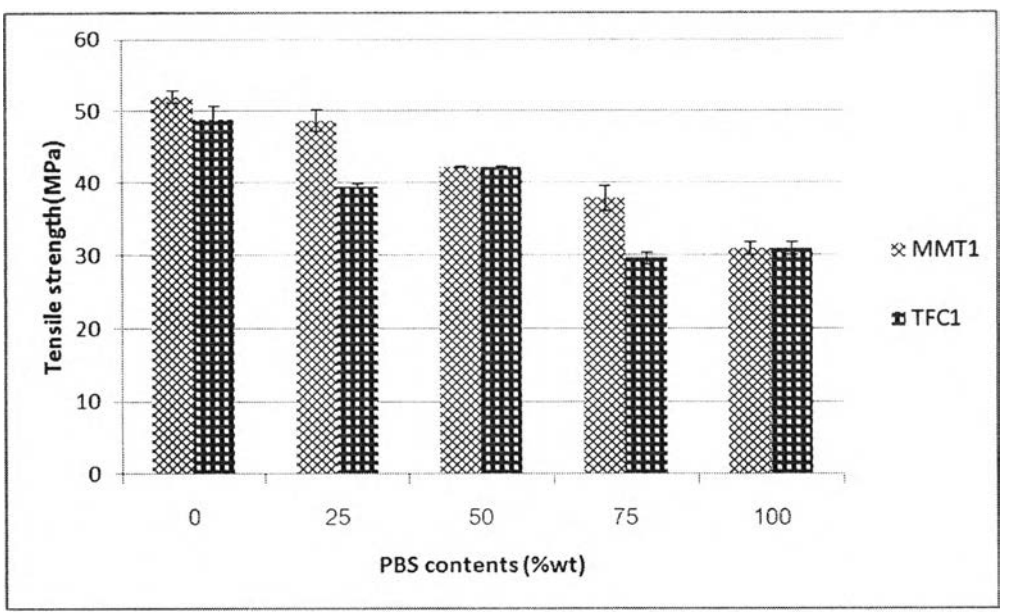


รูปที่ 4.9 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ

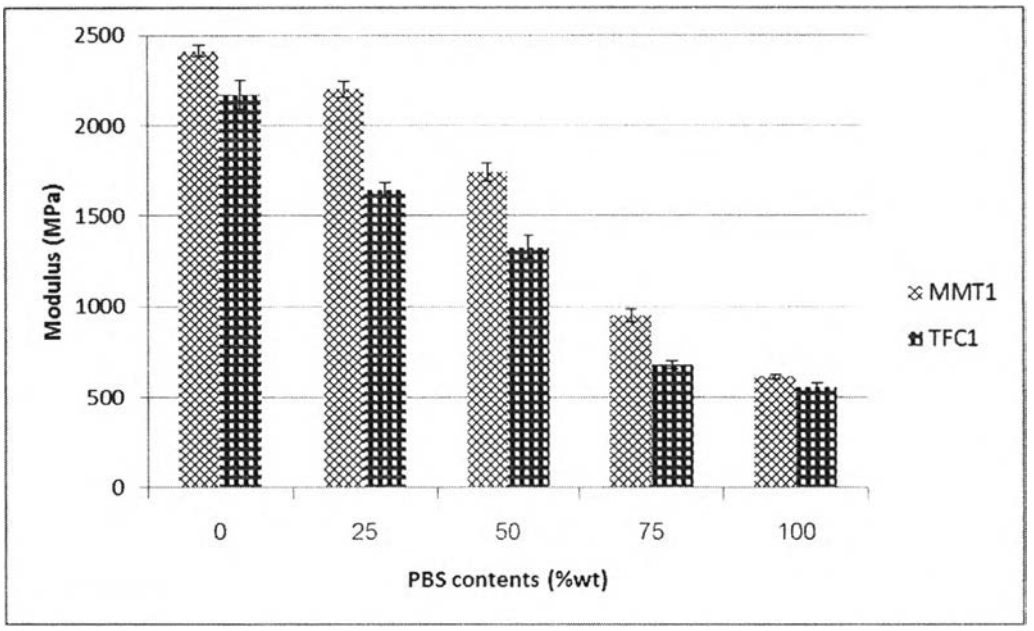
จากผลการทดลองพบว่าความทนแรงดึง และมอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงที่ต่ำกว่าพอลิแล็กทิกแอซิด แต่พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดที่มากกว่าพอลิแล็กทิกแอซิด ดังนั้นเมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในปริมาณที่มากขึ้นจึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงขึ้น แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน 50/50 มีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงที่สุด โดยมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดคิดเป็นร้อยละ 160 ซึ่งสูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดถึง 40 เท่า การที่อัตราส่วนนี้ให้ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดสูงที่สุดอาจเนื่องมาจากที่ปริมาณอัตราส่วนระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเท่ากันทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดเป็นเฟสต่อเนื่อง (co-continuous phase)

เมื่อพิจารณาปริมาณออร์แกโนเคลย์ที่เป็นตัวเติมในพอลิเมอร์ผสมพบว่าเมื่อปริมาณออร์แกโนเคลย์ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นถึง 1 phr ความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากออร์แกโนเคลย์ทำหน้าที่ช่วยรับแรงที่ถ่ายโอนมาจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ และความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ 3 phr อาจเนื่องมาจากการเติมออร์แกโนเคลย์ในปริมาณที่มากจะทำให้ออร์แกโนเคลย์เกิดการเกาะกลุ่มกัน (agglomerate) ทำให้การกระจายแรงจากแมทริกซ์ไปที่ตัวเติมเสริมแรงไม่ดีนัก จึงทำให้ความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงลดลง ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน PLA50/PBS50 พบว่าเมื่อปริมาณออร์แกโนเคลย์มากขึ้นความยืดสูงสุด ณ จุดขาดจะลดลง เนื่องมากจากออร์แกโนเคลย์ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการยืดตัวได้น้อยลง

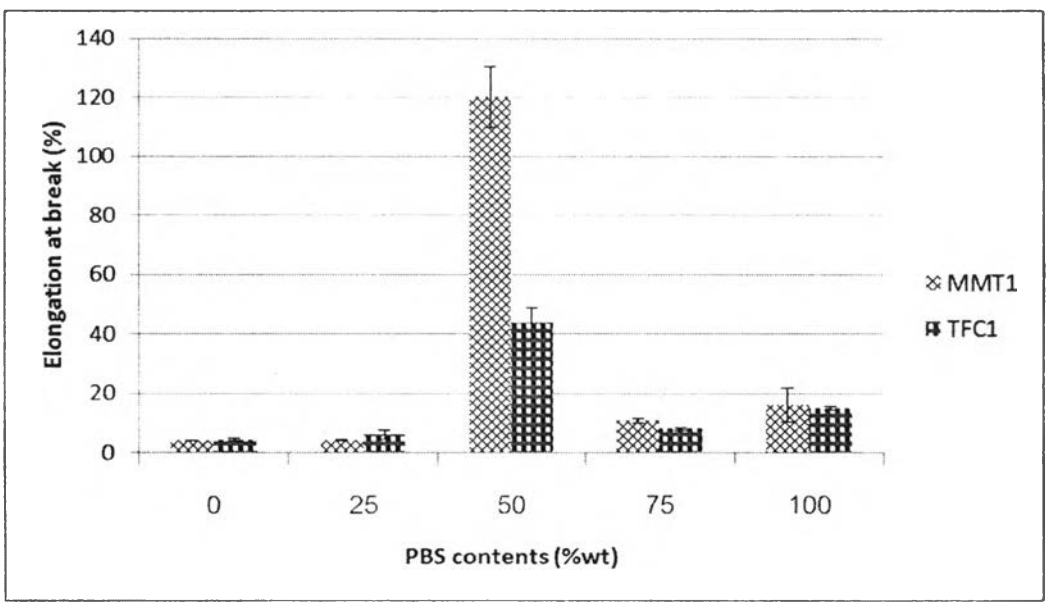
เมื่อพิจารณาจากสมบัติเชิงกลพบว่าการเติมออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 1 phr ในพอลิเมอร์ผสมนั้นแสดงค่าสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด ในงานวิจัยจึงมีความสนใจที่จะใช้ออร์แกโนเคลย์ที่กราฟต์ขอบของชั้นเคลย์ด้วยไกลซิดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนซึ่งเป็นสารที่มีปลายด้านหนึ่งเป็นไซเลนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ขอบของชั้นเคลย์ และมีปลายอีกด้านหนึ่งเป็นหมู่อิพ็อกซีซึ่งจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายสายโซ่ของพอลิเอสเทอร์ได้ ออร์แกโนเคลย์ดัดแปรดังกล่าวจะเรียกว่า twice functionalized organoclay (TFC) โดยจะใช้ที่ปริมาณ 1 phr มาใช้เป็นตัวเติมเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสม โดยความทนแรงดึง มอดุลัสดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ ที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ 1 phr



รูปที่ 4.11 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรที่ปริมาณ 1 phr

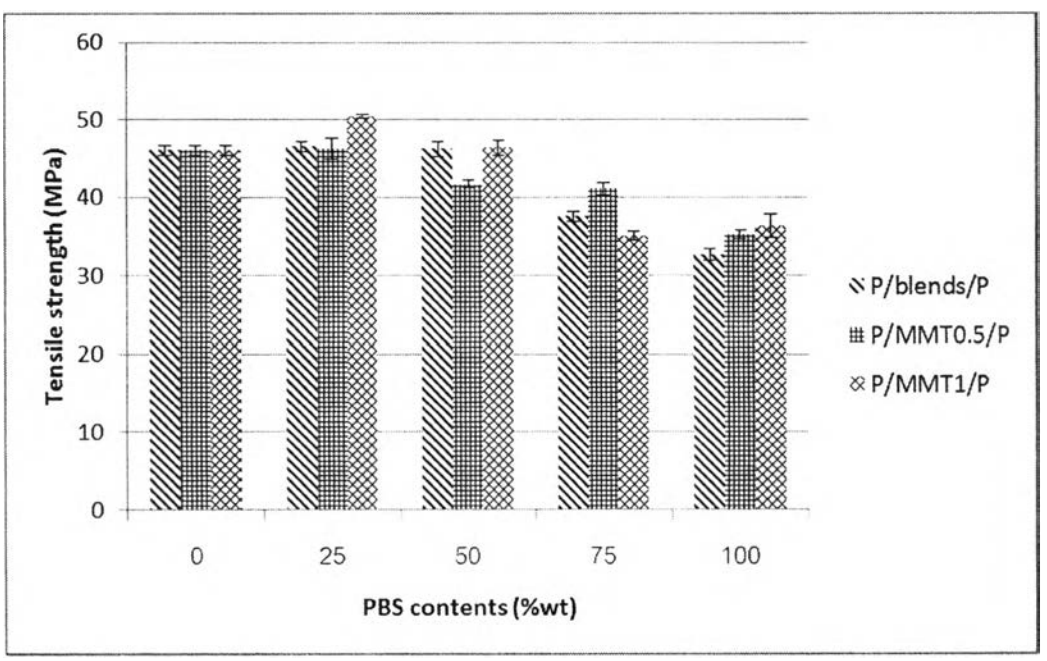


รูปที่ 4.12 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรที่ปริมาณ 1 phr

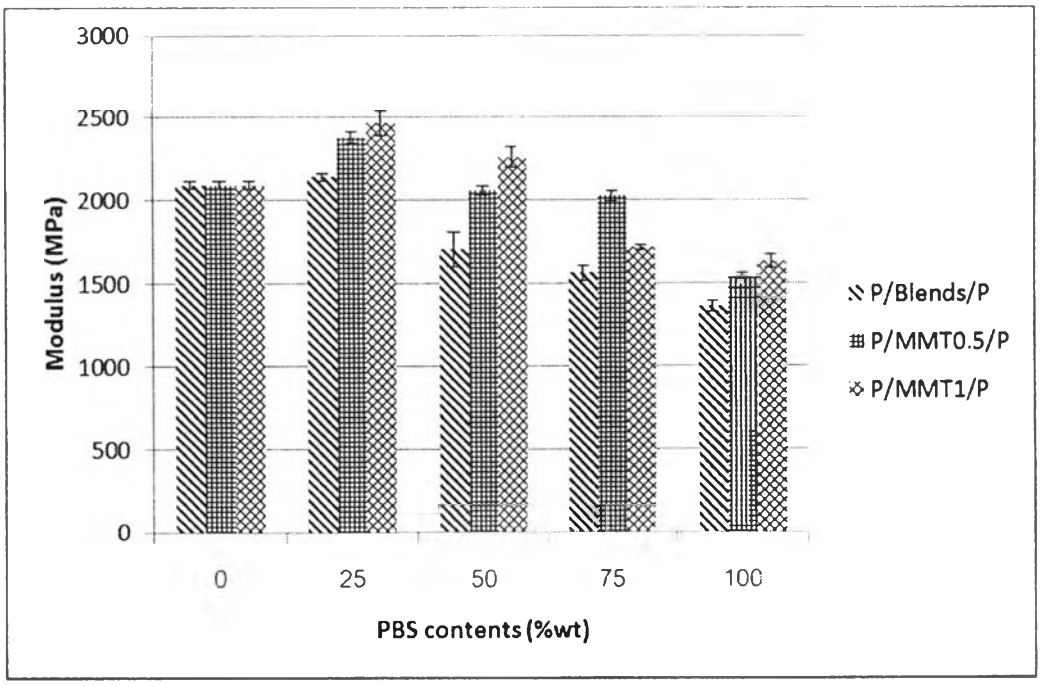
เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปร พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมออร์แกโนเคลย์ดัดแปรที่ปริมาณ 1 phr มีความทนแรงดึง มอดุลัสดึง และความยืดสูงสุด ณ จุดขาดต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติมออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 1 phr เนื่องจากออร์แกโนเคลย์ดัดแปรมีอนุภาคที่ใหญ่กว่าออร์แกโนเคลย์ทางการค้า ทำให้ออร์แกโนเคลย์ดัดแปรรับแรงที่ถ่ายโอนมาจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ไม่ดีนัก ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ดัดแปร ในปริมาณ 0.5 และ 1 phr มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันกับพอลิแล็กทิกแอซิด

4.2.1.2 ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน

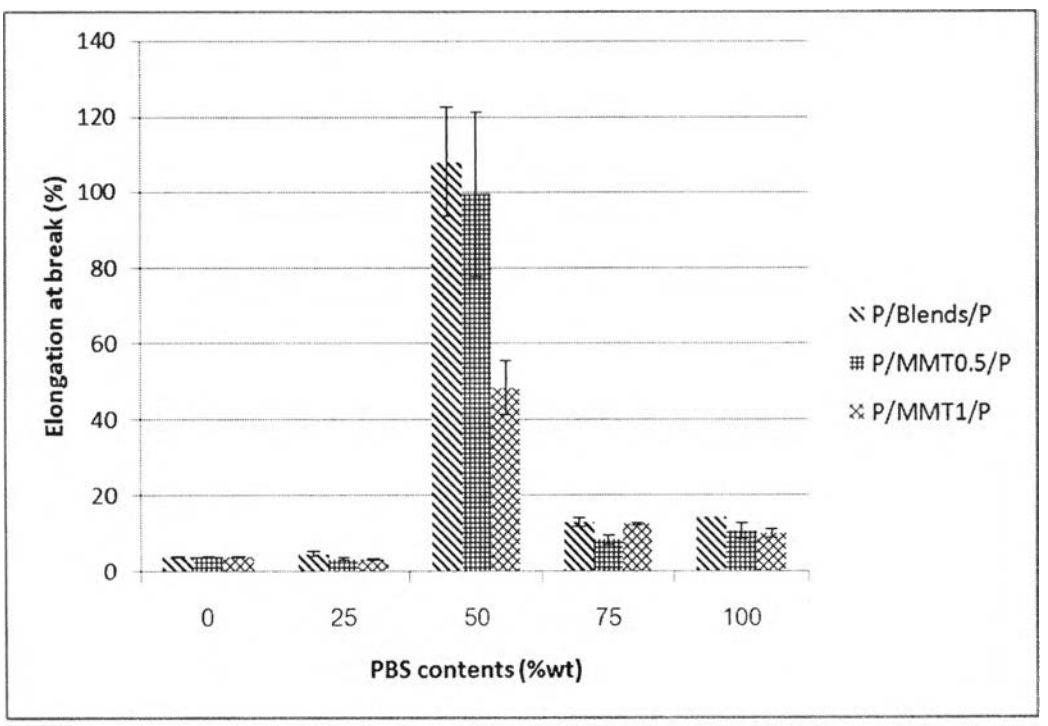
สมบัติความทนแรงดึง มอดุลัสดึงและความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่มีพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0 0.5 และ 1 phr เป็นชั้นกลางระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิด แสดงในรูปที่ 4.13 รูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 ความทนแรงดึงของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.14 มอดุลัสดึงของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ



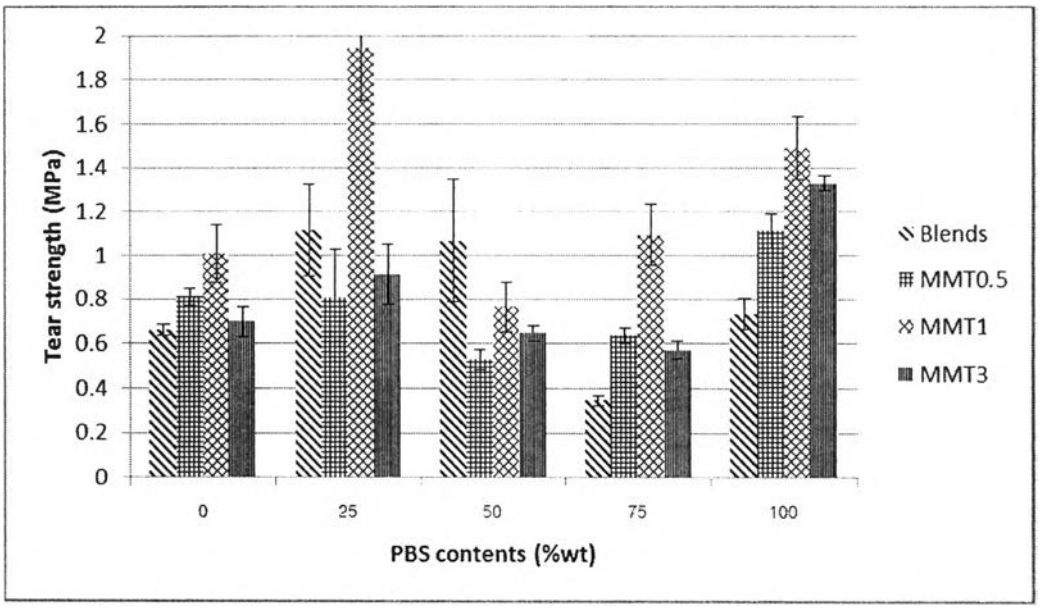
รูปที่ 4.15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจะให้ความทนแรงดึง และมอดุลัสดึงที่สูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว แม้ว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจะมีความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงลดลงตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่เตรียมได้มีค่าความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงที่สูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิด ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์จะให้มีความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงสูงกว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ โดยความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณออร์แกโนเคลย์มากขึ้น เนื่องจากออร์แกโนเคลย์สามารถช่วยรับแรงที่กระจายมาจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่มีชั้นกลางเป็นพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 50/50 ที่ปริมาณออร์แกโนเคลย์ 0 0.5 และ 1 phr จะมีความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงด้วยเนื่องจากอิทธิพลของพอลิแล็กทิกแอซิดที่ประกบอยู่ด้านนอกมีความยืดต่ำ

4.2.2 สมบัติต้านทานแรงฉีกขาด

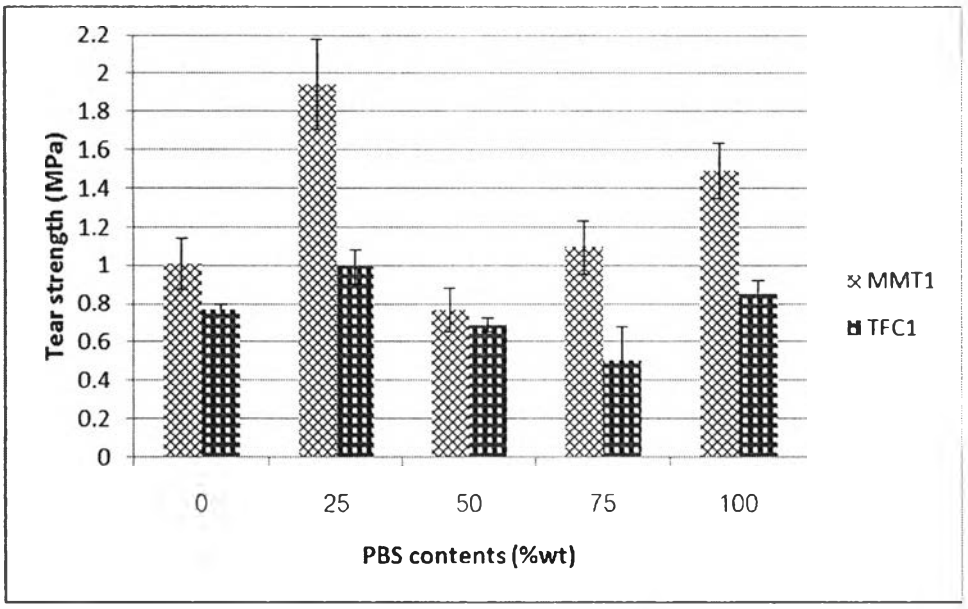
4.2.2.1 ฟิล์มชั้นเดียว

สมบัติต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0 0.5. 1. และ 3 phr แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ

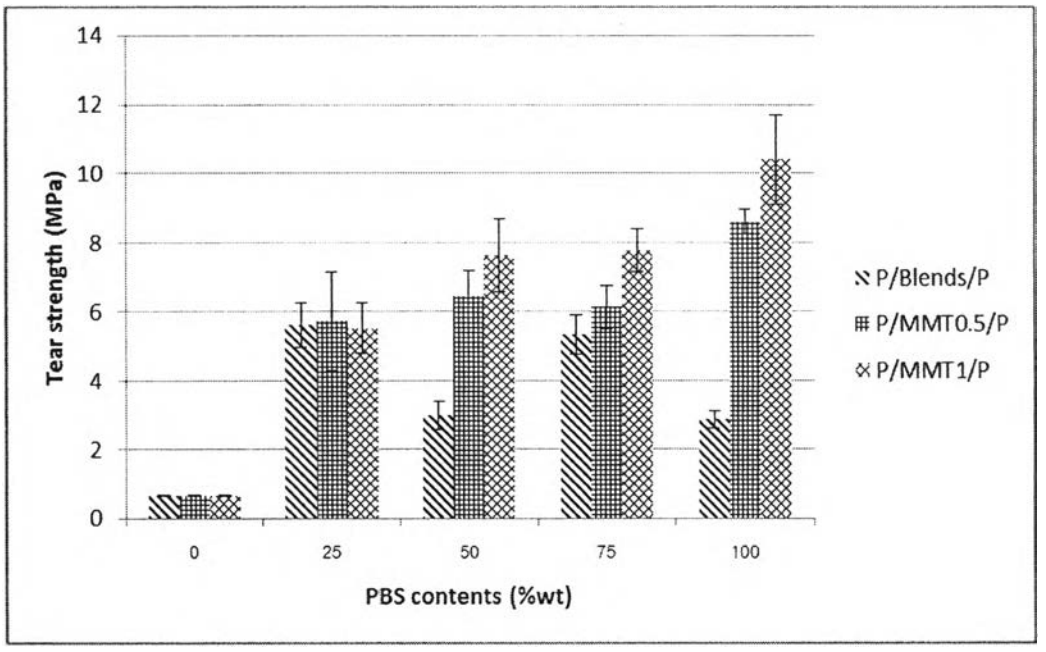
จากการทดสอบค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ในปริมาณ 0 0.5 1 และ 3 phr พบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวสูงกว่าพอลิแล็กทิกแอซิดจึงมีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดสูงกว่า เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจึงช่วยเพิ่มความต้านทานแรงฉีกขาดให้กับพอลิแล็กทิกแอซิดได้ เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์พบว่า ความต้านทานแรงฉีกขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณออร์แกโนเคลย์เพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณ 1 phr และมีค่าลดลงที่ปริมาณ 3 phr เนื่องจากเหตุผลเดียวกับสมบัติด้านแรงดึงคือเกิดจากออร์แกโนเคลย์มาเกาะกลุ่มกัน ทำให้รับแรงที่กระจายมาจากเมทริกซ์ได้ไม่ดีนัก และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรที่ปริมาณ 1 phr เท่ากัน พบว่าความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ดัดแปรมีค่าต่ำกว่าฟิล์มเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร

4.2.2.2 ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน

จากการทดลองพบว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจะให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว และให้ค่าสูงกว่าฟิล์มชั้นเดียวในอัตราส่วนที่เท่ากันอีกด้วย เนื่องจากความแข็งแรงของพอลิแล็กทิกแอซิดที่ประกบอยู่ด้านนอกของฟิล์มช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน



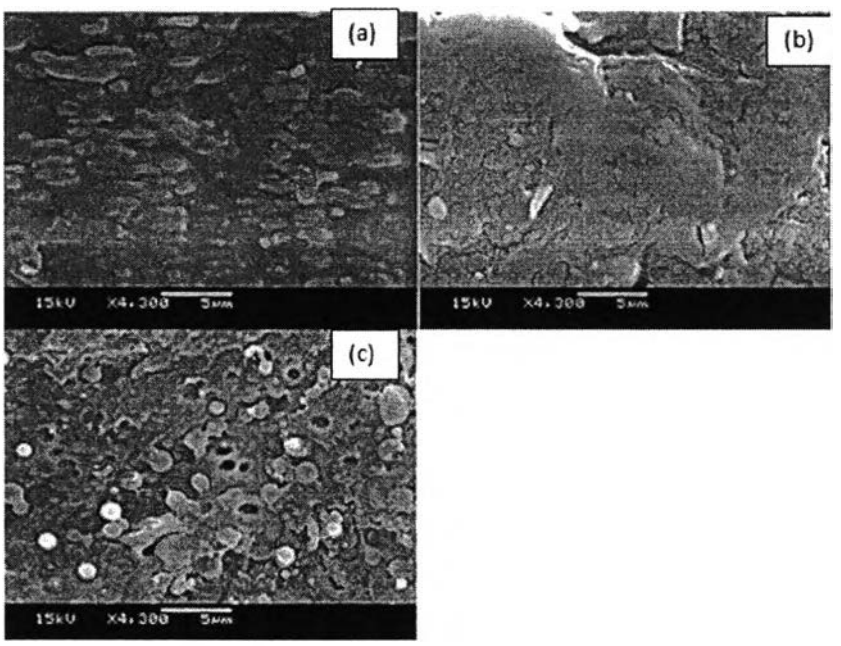
รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ

จากการทดลองพบว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจะให้ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดที่ไม่ได้เสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ และให้ค่าสูงกว่าฟิล์มชั้นเดียวในอัตราส่วนที่เท่ากันอีกด้วย เนื่องจากความแข็งแรงของพอลิแล็กทิกแอซิดที่ประกบอยู่ด้านนอกของฟิล์มช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มโคเอ็กซ์ทรู และฟิล์มชั้นกลางที่เติมออร์แกโนเคลย์จะช่วยรับแรงที่กระจายมาจากเมทริกซ์ได้อีกด้วยจึงทำให้ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันมีความแข็งแรงกว่าฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดที่ไม่ได้เติมออร์แกโนเคลย์ นอกจากนี้อนุภาคของออร์แกโนเคลย์จะช่วยขัดขวางการฉีกขาดของฟิล์มได้อีกด้วย

4.3 สัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์

รูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 75/25

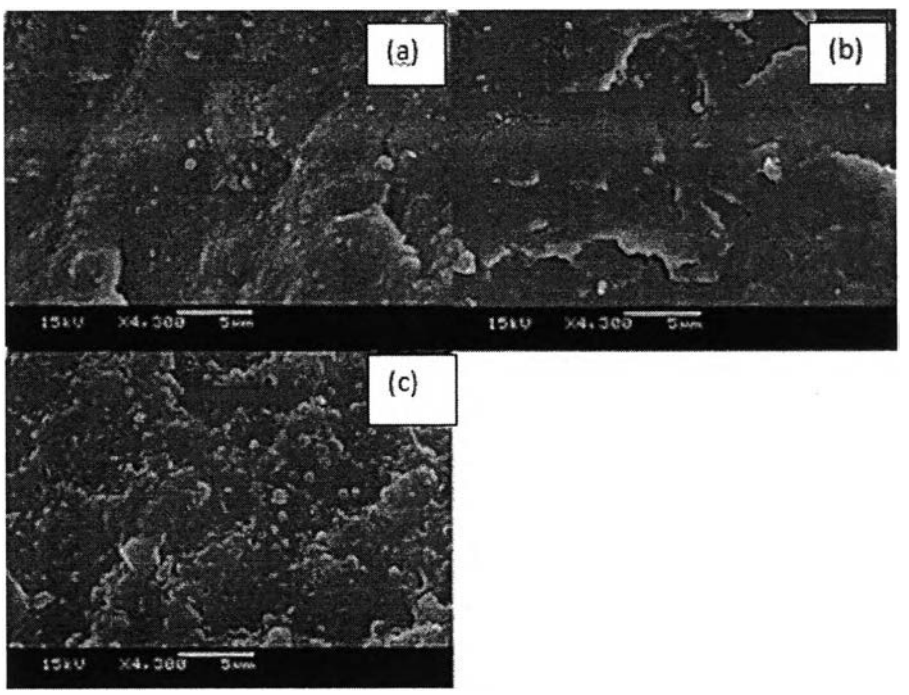
(รูปที่ 4.19 (a))พบว่า พอลิบิวทิลีนซักซิเนตปรากฏในลักษณะของเป็นดิสเพอร์สเฟส มีลักษณะเป็นแท่งในเมทริกซ์ของพอลิแล็กทิกแอซิด [29] แต่ในอัตราส่วนร้อยละ 50/50 ของพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (รูปที่ 4.19 (b))ไม่เห็นการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน เนื่องมาจากเกิดเป็นเฟสต่อเนื่อง (co-continuous phase) และรูปที่ 4.19 (c) แสดงพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิด/ พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 25/75 จะเห็นการแยกเฟสอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75 ตามลำดับ

รูปที่ 4.20 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณ 1 phr พอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 75/25 ที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณ 1 phrพบว่าไม่เห็นการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.20 (a))เมื่อเทียบกับการไม่ได้เติมออร์แกโนเคลย์ (รูปที่ 4.19 (a)) ที่ไม่ได้เติมออร์แกโนเคลย์ดัดแปร ในขณะที่พอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 50/50 ที่มีการเติมออร์แกโน

เคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณ 1 phr ยังคงเห็นเป็นเฟสต่อเนื่อง (รูปที่ 4.20 (b)) และรูปที่ 4.20 (c) แสดงให้เห็นว่าพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 25/75 ที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณ 1 phr นั้นยังคงเห็นมีการแยกเฟสอยู่ แต่จะเห็นว่าดิสเพอร์สเฟสมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเติมออร์แกโนเคลย์จะช่วยลดแรงระหว่างผิว (interfacial tension) ของเฟสที่กระจายตัว โดยออร์แกโนเคลย์จะไปยับยั้งการรวมตัวกันของพอลิเมอร์ที่เป็นดิสเพอร์สเฟส [30]

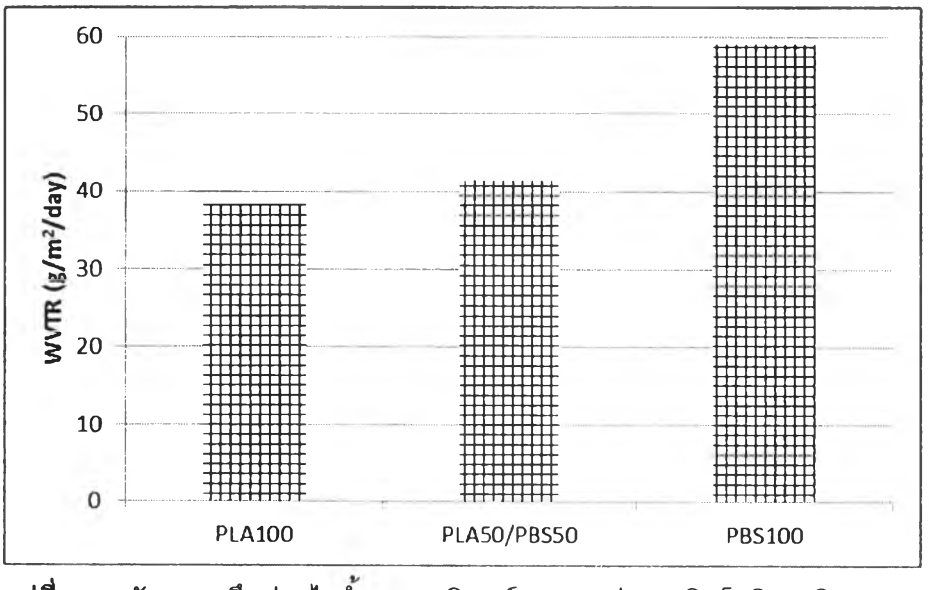


รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75 ตามลำดับโดยมีการเติมออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณ 1 phr

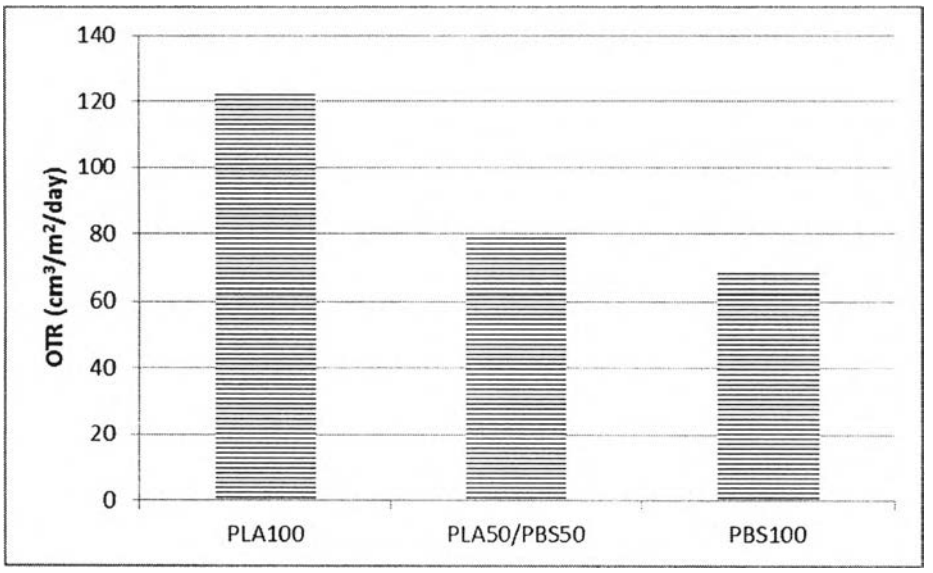
4.4 อัตราการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจน

4.4.1 ฟิล์มชั้นเดียว

อัตราการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.21 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต



รูปที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต

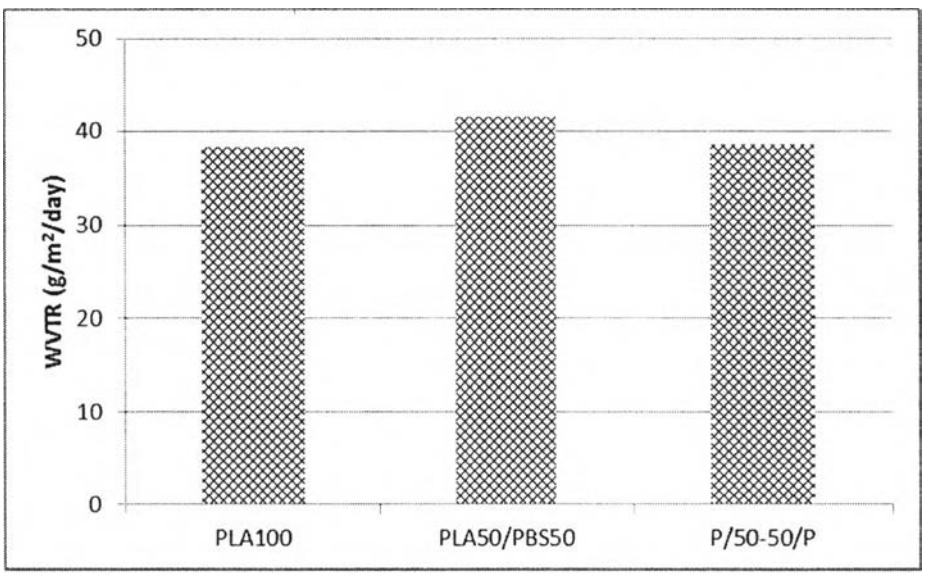
จากผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำพบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดมีค่า 38.3 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน ในขณะที่ฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีค่า 59.0 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน และอัตราการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน 50/50 มีค่า 41.4 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน แสดงให้เห็นว่าพอลิแล็กทิกแอซิดมีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีกว่าพอลิบิวทิลีนซักซิเนต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Randel Shogen ที่พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมีค่าสูงกว่าพอลิแล็กทิกแอซิด [31] และจากการทดสอบพบว่าอัตราการซึมผ่านของพอลิเมอร์ผสมมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนพบว่าอัตราการซึมผ่านของฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิด พอลิบิวทิลีนซักซิเนต และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน 50/50 มีค่า 122 69.1 และ 79.4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้านทานการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าพอ

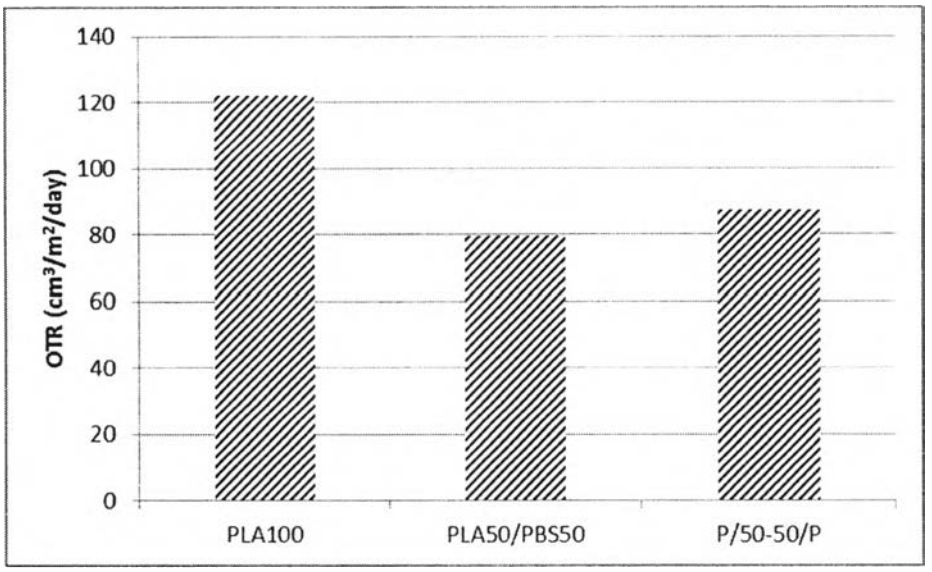
ลิแล็กทิกแอซิด และการเติมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเพิ่มความสามารถในการสกัดกั้นก๊าซออกซิเจนให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้

4.4.2 ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันแสดงในรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน

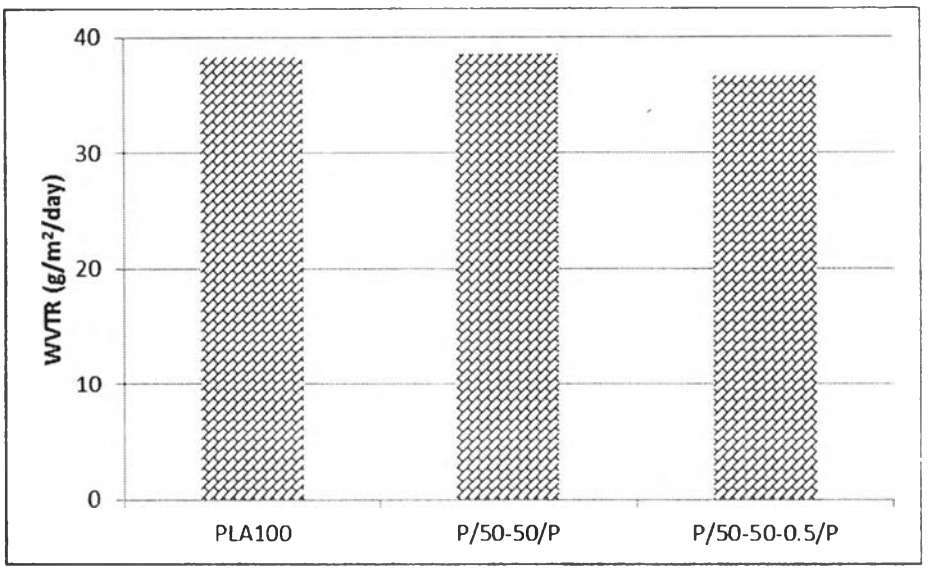


รูปที่ 4.24 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน

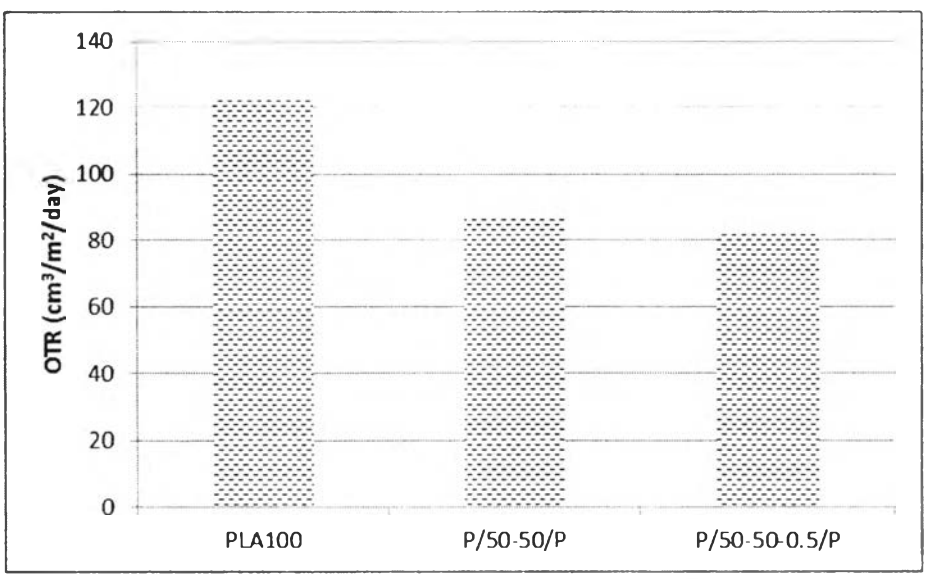
อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันพบว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วน 50/50 ประกบด้วยพอลิแล็กทิกแอซิดมีค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ 38.5 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิด พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน แต่จะช่วยลดอัตราการซึมผ่านไอน้ำให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชั้นเดียวที่อัตราส่วนเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าการทำฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานไอน้ำให้กับฟิล์มได้

อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันพบว่าฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่มีชั้นกลางเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่อัตราส่วน 50/50 โดยประกบด้วยพอลิแล็กทิกแอซิดมีค่า 87.4 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อวัน โดยมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพียงอย่างเดียว แต่มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซที่ต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิด แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการสกัดกั้นก๊าซออกซิเจนที่ดีกว่าฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิด

อัตราการซึมผ่านไอน้ำและก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ 0.5 phr แสดงในรูปที่ 4.25 และ รูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0.5 phr



รูปที่ 4.26 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0.5 phr

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย ในอัตราส่วน P/50-50-0.5/P พบว่ามีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ 36.6 กรัมต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชั้นเดียวและฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว ในขณะที่อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชั้นเดียว และฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิดเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าการเติมออร์แกโนเคลย์สามารถเพิ่มความสามารถในการสกัดกั้นก๊าซออกซิเจนให้แก่ฟิล์มได้ เนื่องจากการเติมออร์แกโนเคลย์จะช่วยเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของก๊าซ [24]